第 43 卷 第 2 期
2023 年 4 月
桂林电子科技大学学报
Journal of Guilin University of Electronic Technology
Vol. 43, No. 2
Apr. 2023

基于 FPGA 的 SDN 中 QoS 保障算法的设计与实现

王俊凯，张向利

（桂林电子科技大学 信息与通信学院，广西 桂林 541004）

摘 要：传统网络越发难以面对复杂化的网络结构，于是诞生了一种新型网络架构，即软件定义网络（SDN）。SDN 数据中心的业务流主要有长流和短流，长流有持续时间长、时延不敏感、带宽需求高的特点；而短流持续时间短、时延敏感程度高、带宽需求低。短流的流量占总流量不足 20％，但流量条数则约占总流量数的 80％以上；长流的流量占总流量 80％以上，但流量条数不足总流量数的 20％。研究发现，在出端口队列中长流往往在短流前，造成短流长时间等待，极易引发网络拥塞。根据 2 种业务流特点提出排队机制和路由优化保障机制，将短流设置为高优先级队列，由 SDN 控制器优先调度排队机制；将长流设置为低优先级队列，同时采用路由保障算法进行补偿。路由保障算法首先删除不满足长流带宽需求的链路，再计算最短时延路径。为了提升本设计的算法效率，使用 FPGA 和万兆以太网对 SDN 中业务流进行仿真，并在 FPGA 上仿真验证了本设计对于网络的时延、带宽的优化与 FPGA 并行运算的优势。

关键词：FPGA；SDN；队列调度；QoS；带宽保障

中图分类号：TP309　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-808X(2023)02-0139-06

Design and implementation of QoS guarantee algorithm in SDN based on FPGA

WANG Junkai, ZHANG Xiangli

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The traditional network is increasingly difficult to face the complex network structure, so a new network architecture is born, namely software defined network (SDN). The service flow of SDN data center mainly includes long stream and short stream. The long stream has the characteristics of long duration, insensitive delay and high bandwidth demand; while short flow has short duration, high delay sensitivity and low bandwidth requirement. Short flows account for less than 20% of the total traffic, but the number of traffic bars is about 80% or more of the total traffic; long flows account for more than 80% of the total traffic, but the number of traffic bars is less than 20% of the total traffic. It is found that the long flow is often ahead of the short flow in the outgoing port queue, causing the short flow to wait for a long time, which is very likely to cause network congestion. The design proposes a queuing mechanism and a route optimization guarantee mechanism based on the characteristics of the two service flows, setting the short flows as high-priority queues, which are prioritized and scheduled by the SDN controller; setting the long flows as low-priority queues, while using a route guarantee algorithm for compensation. The routing assurance algorithm first removes the links that do not meet the bandwidth requirements of the long flows, and then calculates the shortest delay path. In order to improve the efficiency of the algorithm of this design′ FPGA and 10G ethernet are used to simulate the service flow in SDN, and simulate on FPGA to verify the advantages of this design for the optimization of network delay, bandwidth and FPGA parallel computing.

Key words: FPGA; SDN; queue scheduling; QoS; bandwidth guarantee

网络服务质量（QoS）随着互联网的使用就引发人们的关注。几十年来，研究学者提出很多关于 QoS 的保障技术，随着软件定义网络（software defined network，简称 SDN）的出现，也带来了新的解

收稿日期：2022-03-21

基金项目：广西无线宽带通信与信号处理重点实验室主任基金（GXKL06200104）；广西云计算与大数据协同创新中心基金（YD1904）；广西自然科学基金（2020GXNSFDA238001）；桂林电子科技大学研究生教育创新计划（2021YCXS021）

通信作者：张向利（1968－），女，教授，博士，研究方向为 SDN/NFV 网络以及 FPGA 嵌入式系统开发等。E-mail：304146684@qq.com

引文格式：王俊凯，张向利. 基于 FPGA 的 SDN 中 QoS 保障算法的设计与实现[J]. 桂林电子科技大学学报，2023，43(2)：139-144.

决方案，将 SDN 网络架构应用到 QoS 的保障中[1-3]。对于基于 SDN 网络架构的 QoS 保障技术，国内外研究学者做出了很多贡献。Ghalwash 等[4]设计了一个包含监视、路由确定、规则准备和配置功能的 SDN 架构，对 QoS 中的端口利用率和时延 2 个参数优化。Guck 等[5]针对工业互联网中的实时性流量业务的 QoS 保障问题，设计了 2 种模型。第一个多跳模型（MHM），给网络中的每个队列分配一个合适的速率和缓冲区预算。第二个基于阈值的模型（TBM），为每个队列确定一个最大时延来保障 QoS 的时延要求。Bagaa 等[6]利用 OpenFlow 协议进行排队和多路径转发的操作，引入了一种 QoS 感知的网络配置和多路径转发方法，对 SDN 网络架构中的开放式虚拟交换机（OVSs）进行操作，提高服务质量（QoS）。Chen 等[7]在 QoS 敏感的应用场景，设计了一种基于 LLDP 的新型非侵入的 QoS 保障方案。在 SDN 控制层进行 QoS 感知路径发现，求出服务质量在有约束和无约束场景下最优 K 条路由路径。Kucminski 等[8]根据用户需求对业务流量进行优先排序，对重要的业务流量保证足够的带宽、较低延迟和减少数据包的丢失。Li 等[9]在 SDN 控制器上实现了一种应用程序识别技术，以确定每种应用程序类型所需的 QoS 级别，其队列调度技术将应用程序流排入不同的队列，并使用不同的优先级调度队列。Yan 等[10]提出了一种使用 SDN 提供服务质量保证的 HiQoS 设计。HiQoS 利用源和目的地之间的多路径和队列机制来保证不同类型业务的 QoS，为不同的业务流量提供对应的带宽保证，其主要利用等价花费多路径算法（ECMP）寻找源与目的节点的多个路径，排队机制对有特殊要求的服务提供所需的带宽保证。Sun 等[11]提出一种智能路由机制（QI-RM）来保障 QoS。结合机器学习算法提出数据流分类方法 MACCA2-RF & RF，以识别数据流类别，满足服务质量要求。链路参数的设计考虑了多种 QoS 要求，根据链路参数，提出了 QoS 保证路径选择算法，该算法可以根据不同的数据流和不同的 QoS 要求选择 QoS 保证的路由路径。针对链路拥塞的情况，提出了局部路由变更算法，该算法只调整拥塞链路前后的链路，而不调整整条路径。Bahnasse 等[12]提出一种新的基于 SDN 的 MPLS 流量工程区分服务（DS-TE）网络管理体系结构，该体系结构遵循一种新的智能的动态带宽分配模型，在 QoS 约束下管理 QoS 和路由。该体系结构不仅适用于 SDN 的设备，同样适用于传统的网络设备。Elbasheer 等[13]针对视频流业务提出了一种基于 SDN 的动态 QoS 算法，通过选择满足视频 QoS 的最优路径来优化用户体验质量（QoE）。区分流量类型的基础上选择不同视频分辨率参数，QoE 参数分为标准清晰度（SD）和高清晰度（HD）。Chen 等[14]基于 SDN 网络架构设计了一种 QoS 感知 AP 节能机制，利用 QoS 感知设计提前预测用户所需的带宽，AP 节能机制控制用户与 AP 之间的连接。在用户有带宽需求时连接用户与 AP，空闲时关闭，从而节省了 AP 的使用。张强等[15]在 FPGA 中通过堆排序的处理方式进行 QoS 保障，提高了数据的吞吐量。

综上所述，SDN 中的 QoS 保障方法大多使用软件平台，受限于 CPU 的性能，只针对某特殊场景，未将路由策略与调度策略结合。因此，利用 FPGA 的灵活性、传输处理数据的高效性和扩展性，设计了一种基于 FPGA 优先调度和路由保障算法。

1 队列调度与路由保障算法设计

传统的 IP 网络在传输数据包时按照先来先服务的方式转发，不对业务数据流区分对待，只是尽力而为地转发。不根据业务流的特点进行区分，在时延、带宽保障、可靠性等方面得不到 QoS 保障，在数据量增大时很有可能造成网络拥塞，进而引发整个网络系统瘫痪。面对数据中心的业务流主要分为对时延敏感、带宽需求小的短流和带宽需求高、时延不敏感的长流。常见的队列算法主要有先来先服务（FCFS）、加权公平队列（WFQ）、优先级队列（PQ）等。

本实验使用先来先服务（FCFS）与优先级队列调度（PQ）进行对比。本设计采用 PQ 队列保障时延敏感的短流的服务质量，并与常用的 FCFS 进行比较。业务流主要为时延敏感的短流与带宽需求高的长流，优先级队列调度算法的致命缺点是高优先级队列长时间占用服务，使得低优先级队列“饿死”，但是短流持续时间短，使得低优先级队列的分组出现“饿死”的概率降低。

路由算法是在 PQ 调度后 SDN 控制器下发流表路径的一种最短路径算法。计算短流时以时延为权值求最短路径，长流删除不满足其带宽要求的链路再求最短时延路径。为了直观了解算法流程，设计一个简单的网络拓扑图。图 1 为（时延，带宽）计算不同业务流从源节点 S_1 到目的节点 S_6 的路径。对于短流可知路径为 $S_1-S_2-S_4-S_6$。长流需求为 2 的长流修改后的拓扑如图 2 所示，删除链路带宽小于 2 的链路后，获得用 Dijkstra 算法得到的最短时延路径 $S_1-S_2-S_5-S_4-S_6$。

输入：网络拓扑 G，PQ 队列调度出来的业务流

输出：业务流的最短路径 path

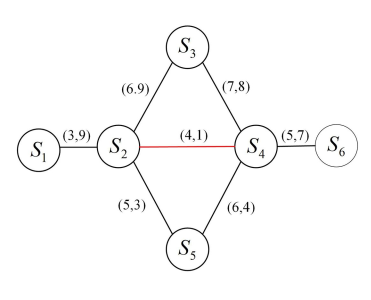


图 1　原始拓扑

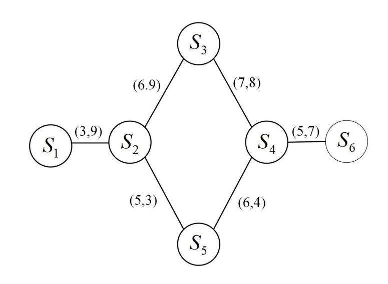


图 2　修改后的拓扑

```
提取业务流关键信息(源目的节点端口)
提取带宽需求信息，
if 业务流==长流 then
  修改 G 中链路得到 TempG
 else
  Dijkstra 算法求出源目的节点的路径 path
 end if
```

本设计的队列调度与路由保障算法比常见的 QoS 保障算法，增加了对带宽的保障，节省了网络开销。对比常见的等价路由(equal cost multi-path，简称 ECMP)算法，路由保障算法减少了网络设备之间的开销。因为 ECMP 使用多条路径传输带宽需求高的长流业务，增加了节点之间的开销和业务流分割与拼接的开销。

2　基于 FPGA 算法实现过程

基于 FPGA 实现队列调度与路由保障算法。FPGA 的灵活性和扩展性与 SDN 的灵活配置、软硬性解耦合的相性相吻合。现有的 SDN 中的 QoS 保障方法大多使用软件平台，受限于 CPU 的性能，处理能力遇到瓶颈[16]。同时 FPGA 中丰富的网络接口资源、并行计算和 10 GiB 数据传输速率有着更好的性能保障业务流的 QoS[17]。

FPGA 中核心算法代码设计主要集中在算法模块中，该模块设计框图如图 3 所示，在数据接收后进入分类模块分类，若数据包为 ARP 或者 ICMP 协议，则跳过算法模块，进行数据封装并发送，实现自动响应；若数据包为 UDP 协议，则判断业务类后进入不同的队列。长短流队列根据优先级调度进行路由计算，得到自身的路由路径后，通过 UDP 封装模块发送路径。

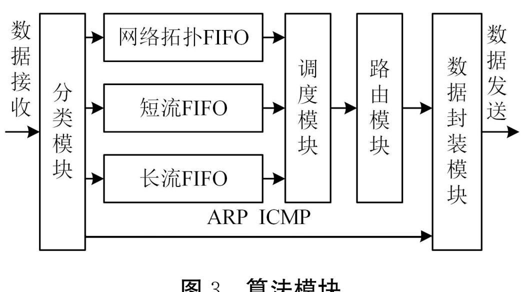


图 3　算法模块

输入流解析方法和优先级调度：如图 3 中的算法模块中有分类器模块，对 UDP 的数据包进行解析，根据 IP v4 的 ToS(type of server)字段信息分类给对应的 FIFO 队列，该字段信息承载 QoS 优先性和服务类型。本设计对业务的划分主要分为网络中应用最广泛的 2 种业务流长流和短流。网络拓扑信息用于路径计算。计算结束时对算法的结果进行封装并传至电脑端。自定义的 UDP 数据包数据部分字段信息的格式主要有源交换机、源端口、目的交换机、目的端口、时延和带宽信息，都占用 8 bit 数据位宽。UDP 数据包类型为网络的配置信息，代表网络拓扑图中一条边的信息，为短流时代表业务流的需求时延即最大的时延，短流对带宽需求低带宽字段信息保留；为长流时带宽表示带宽需求，长流对时延要求不敏感，时延字段信息保留。

拓扑输入与建图：在算法部署中，利用存储器 RAM 来实现邻接矩阵的更新删除，即网络拓扑队列最先进入算法模块存储在 RAM1。RAM1 内部结构如表 1 所示，包含地址信息和数据信息 2 部分。地址信息由 10 bit 组成，其中包括 5 bit 源节点 ID(网络拓扑图中一条边的起始节点)和 5 bit 节点 ID(网络拓扑图中一条边的终止节点)。数据信息包括 8 bit 的源交换机 ID、8 bit 源交换机端口号、8 bit 目的交换机 ID、8 bit 目的交换机端口号、8 bit 链路时延权值信息和 8 bit 链路带宽权值信息。

表 1　RAM1 的设计　　bit

地址		数据					
源节点	目的节点	源交换机	源端口	目的交换机	目的端口	时延权值	带宽权值
5	5	8	8	8	8	8	8

在 FPGA 中实现 QoS 保障算法算法步骤的伪代码如下。

输入：不同的网络拓扑图 G，混合业务流数据

输出：业务流的最短路径 path

1. 接收缓存不同端口的数据。

2. 提取业务流数据帧关键信息(源目的节点端口)。

3. 分类模块根据 IP 字段的 ToS(type of server)进行分类缓存不同的优先级队列。

4. 提取网络拓扑 fifo，存入 RAM1，构建初始的领接矩阵。

5. 根据 PQ 算法对短流的数据帧优先处理，路由算法状态从 IDLE 跳转 initial。

6. initial 状态初始化源节点存入 RAM_node，跳转 iteration 状态。

7. iteration 状态判断目的节点是否在 RAM_node 的集合中。

If dis_node ∈ RAM_node

then node_flag==1;

output RAM_S(short_path)

else　node_flag==0

goto 7

8. min_dist 状态找出一个距离 Src 最近的未标记的节点 temp。

9. 进入 update 状态，以 temp 节点为前驱节点更新领接矩阵。

10. 回到 iteration 状态再次判断。

在路由保障算法中，节点之间的时延不断改变，因此使用 RAM 以节点序号为地址，对其不断更改。RAM_S 的结构如表 2 所示，数据位低 8 位存储的是时延权重，地址作为节点序号，方便更新不同的节点序号，也便于计算与前驱节点相连的最短路径，得到最短路径后，最高位标志位置 1。

表 2　RAM_S 结构　　bit

地址	数据			
节点序号	标志位	保留	前驱节点	时延权重
5	1	15	8	8

3　实验结果

3.1　实验环境

为了验证算法的有效性和高效性，使用 Java 语言在 IDEA2019 软件中对路由保障算法进行验证。硬件端使用 Verilog 语言在集成开发环境 Vivado 2017.3 中模拟路由保障算法。

3.2　万兆以太网的连通性测试

K7325 T 开发板与 PC 端之间的万兆以太网进行通信测试。首先 PC 端 IP 地址设置为 192.168.1.110，与表 3 中的端口 IP 地址的最后一个字段的值不同，子网掩码设置为 255.255.255.0。在 PC 端插入一张万兆网卡，万兆网卡内插入的 SFP+光电转换模块连接光纤，另一端连接插好 SFP+光电转换模块的 FPGA 端口，至此完成了 PC 端与 K7325T 开发板的连接。

表 3　端口地址

端口	IP 地址	MAC 地址
Port0	192.168.1.100	58:69:6C:69:6E:78
Port1	192.168.1.101	58:69:6C:69:6E:79
Port2	192.168.1.102	58:69:6C:69:6E:7A
Port3	192.168.1.103	58:69:6C:69:6E:7B

PC 端发送 ping 包，如图 4、5 所示，PC 端收到 K7325T 开发板的应答消息后，对其他端口进行测试。

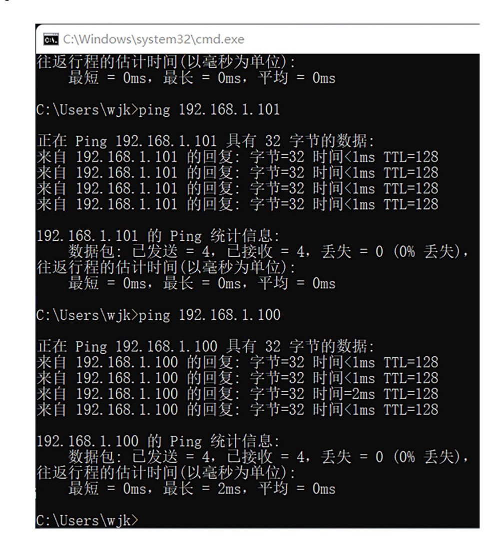


图 4　0,1 端口测试结果

3.3　路由保障算法验证

使用 Abilene 网络拓扑[18]随机设置时延的范围为[1,10]，带宽权重为[0,5]，值为 0 时，代表该链路可以传输对带宽要求不高的短流，但不满足长流的带宽需求。使用仿真软件将网络拓扑信息和业务请求信息按照自定义的 UDP 数据包格式发送。使用路由保障算法验证从源节点 1 到目的节点 7 的路径。如图 6 中红色的矩阵中位时延最短的路径，每条路径计算出来时，将 fifo_udp_wr 拉高，路径信息写入 fifo_udp_data_din 后，通过 udp 协议封装发送出来，即 fifo_udp_data_din[127:119]=0x01010201 信号的代表从 01 交换机节点的 01 端口到达 02 交换机节点的 01 端口即为 1—2；如图 6 所示：路径为短流的最短路

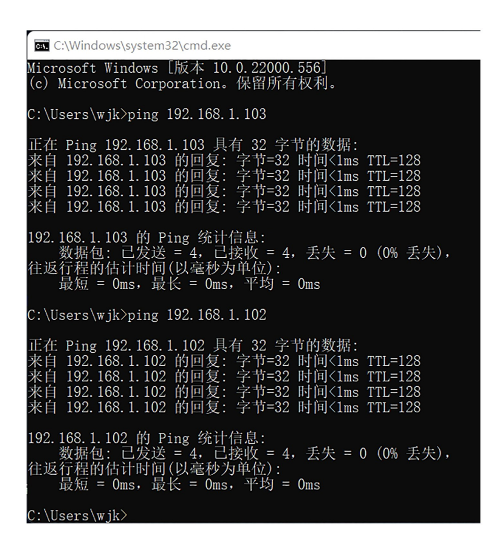


图 5　2,3 端口测试结果

径即 1—2—3—5—7。如图 7 所示:长流带宽保障的路径为 1—2—5—7。为了验证路由算法的正确性和 FPGA 对算法的加速性能,同时在软件端运行路由保障算法来进行验证。

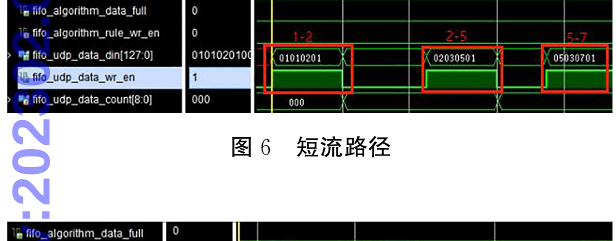


图 6　短流路径

图 7　长流路径

除 Abilene 网络拓扑外,还对其他拓扑进行计算并与软件的运算时间进行对比。引入加速比 S 来体现 FPGA 的高效性。

$$S=\frac{T_s}{T_h},\qquad(1)$$

其中:T_s 为软件平台(Software)算法的执行时间;T_h 为硬件平台(Hardware)算法的执行时间。不同网络拓扑算法的软、硬件时间及加速比如表 4 所示。

表 4　不同网络拓扑算法软硬件时间及加速比

网络拓扑	软件时间/μs	硬件时间/μs	加速比
Abilene	1 156.7	41.4	27.9
Poska	995.6	29.6	33.6
Atlanta	883.5	13.2	66.9

软件端实现时有大量的 API 接口可以直接使用,实现方式简单、成本较低,而 FPGA 使用硬件描述语言实现,其复杂度远高于软件端。FPGA 中有高速高精度晶振,可保证系统的稳定性,主要用于大量数据处理和高速数据接口。例如,一些网络设备芯片开发中使用 FPGA 做验证。软件端适用于低速数据处理及应用开发中,实现成本低。

3.4　业务流的排队与处理时延

基于严格的优先级队列调度,在同一拓扑下设置不同长度的业务流量短流和长流的数量比为 4∶1,即 50 个数据包中有 40 个短流和 10 个长流。Benson 等[19]调查发现,数据中心网络中短流的数量占总流量数量的 80%以上。排队时延情况如图 8 所示,短流是高优先级队列,只需等待网络拓扑队列调度后,马上转发,因在同一网络拓扑下短流的排队时延固定为 220 ns。长流需要等待短流的队列调度完成后才能调度,且随着短流的队列长度而增加。可知该设计保障了短流的时延要求,路由算法保障了长流的带宽要求。FCFS 调度策略出现了长流在短流前面的现象[20],原因是长流数量少,能先调度完。虽然 PQ 调度牺牲了长流的排队时延换取短流的低时延服务保障,持续时间长的长流进行路由带宽保障算法,但是短流业务的 QoS 时延需求和长流业务的 QoS 带宽需求都得到了保障。

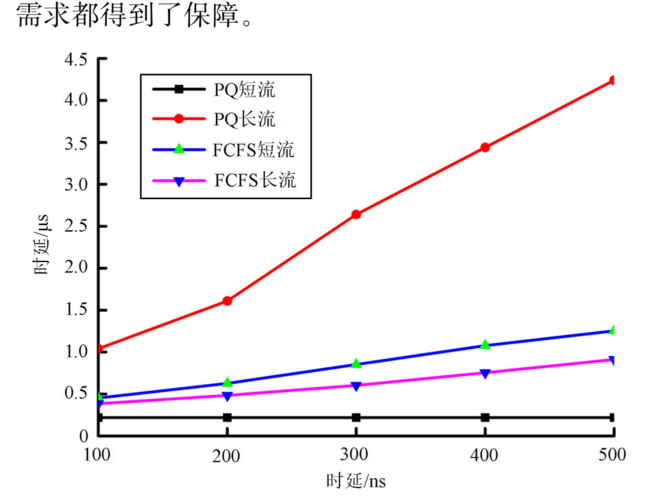


图 8　2 种业务流的排队时延对比

业务调度后处理时延:业务流调度出队后就是对业务流进行路径算法,下发流表路径。流表路径只在第一次路由计算时需要几十微秒的时间,之后对于相同源目的节点和带宽的业务流只需要经行查表操作,此时的处理时延很小。

4　结束语

针对 SDN 网络中业务流的 QoS 保障问题,该算法在调度时对比先来先服务与优先级队列调度的算法

在长短流下的表现。在路由优化保障机制时，先对全局网络链路的带宽进行搜寻，去除带宽低于长流带宽需求的链路，再计算时延最短路径。实验结果表明，基于 FPGA 的 SDN 网络的 QoS 保障算法运行速度快，对时间敏感业务的时延 QoS 有所提升，对带宽需求高的长流带宽 QoS 进行了保障。下一步准备优化 RAM 结构的数据存储方式，并在更复杂的网络下实验。

参考文献：

[1] TOMOVIC S, PRASAD N, RADUSINOVIC I. SDN control framework for QoS provisioning[C]//IEEE Conference on 22nd Telecommunications Forum Telfor. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 111-114.

[2] BARI M F, CHOWDHURY S R, AHMED R, et al. PolicyCop: an autonomic QoS policy enforcement framework for software defined networks[C]//IEEE Conference on SDN for Future Networks and Services. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013: 1-7.

[3] VENKATESH K, SRINIVAS L N B, KRISHNAN M B M, et al. QoS improvisation of delay sensitive communication using SDN based multipath routing for medical applications[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 93: 256-265.

[4] GHALWASH H, HUANG C H. A QoS framework for SDN-based networks[C]//2018 IEEE 4th International Conference on Collaboration and Internet Computing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2018: 98-105.

[5] GUCK J W, VAN BEMTEN A, KELLERER W. DETSERV: network models for real-time QoS provisioning in SDN-based industrial environments[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2017, 14(4): 1003-1017.

[6] BAGAA M, DUTRA D L C, TALEB T, et al. On SDN-driven network optimization and QoS aware routing using multiple paths[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(7): 4700-4714.

[7] CHEN X, WU J L, WU T. The top-K QoS-aware paths discovery for source routing in SDN[J]. KSII Transactions on Internet and Information Systems, 2018, 12(6): 2534-2553.

[8] KUCMINSKI A, AL-JAWAD A, SHAH P, et al. QoS-based routing over software defined networks[C]//2017 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1-6.

[9] LI F L, CAO J N, WANG X W, et al. A QoS guaranteed technique for cloud applications based on software defined networking[J]. IEEE Access, 2017, 5: 21229-21241.

[10] YAN J Y, ZHANG H L, SHUAI Q J, et al. HiQoS: an SDN-based multipath QoS solution[J]. China Communications, 2015, 12(5): 123-133.

[11] SUN W F, WANG Z, ZHANG G H. A QoS-guaranteed intelligent routing mechanism in software-defined networks[J]. Computer Networks, 2021, 185: 107709.

[12] BAHNASSE A, LOUHAB F E, OULAHYANE H A, et al. Novel SDN architecture for smart MPLS traffic engineering-diffServ aware management[J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 87: 115-126.

[13] ELBASHEER M O, ALDEGHEISHEM A, LLORET J, et al. A QoS-Based routing algorithm over software defined networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2021, 194: 103215.

[14] CHEN Y J, SHEN Y H, WANG L C. Achieving energy saving with QoS guarantee for WLAN using SDN[C]//2016 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 1-7.

[15] 张强，张红梅，张向利. QoS 保障机制中堆排序的 on-the-fly 处理结构的实现[J]. 桂林电子科技大学学报，2018，38(1)：12-15.

[16] DENG Y H, WANG Y, HE X S, et al. An inter-domain transmission path selection approach of multi-controller SDN network based on FPGA[C]//2018 14th International Conference on Computational Intelligence and Security. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2018: 66-70.

[17] 董永吉，王钰，袁征. 基于 FPGA 的万兆以太网 UDP_IP 硬件协议栈设计与实现[J]. 计算机应用研究，2022，38(4)：11-14.

[18] ORLOWSKI S, WESSALY R, TOMASZEWSKI A, et al. SNDlib survivable network design library[EB/OL]. (2017-12-17)[202-11-15]. http://sndlib.zib.de/home.

[19] BENSON T, AKELLA A, MALTZ D A. Network traffic characteristics of data centers in the wild[C]//Proceedings of the 10th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement. New York, NY: ACM Press, 2010: 267-280.

[20] AFAQ M, REHRMAN S U, SONG W C. A framework for classification and visualization of elephant flows in SDN-based networks[J]. Procedia Computer Science, 2015, 65: 672-681.

编辑：梁王欢